

西兰花乳清发酵饮料工艺优化及其 抗氧化活性研究

李坤林, 魏光强, 董文明*, 黄艾祥*

(云南农业大学食品科学技术学院, 昆明 650201)

摘要: **目的** 优化西兰花乳清发酵饮料工艺并研究其抗氧化活性。**方法** 以乳清、西兰花为原料, 采用益生菌蔬菜酵素浸泡发酵, 通过单因素和正交实验筛选最优工艺, 进一步添加品质改良剂调配, 制备西兰花乳清发酵饮料, 并对产品的感官、理化、微生物以及抗氧化活性进行研究。**结果** 筛选的最佳工艺为: 切块西兰花添加量 20%, 白砂糖 15%, 发酵剂 0.050%, 35 °C 发酵 6 d; 滤出西兰花, 向滤液中添加 0.265% 品质改良剂 (最佳调配工艺为: 海藻酸钠 0.150%, β -环糊精 0.100%, 柠檬酸钠 0.015%), 混匀, 均质。产品 pH 为 3.84 ± 0.07 , 糖度 8°Bx , 粗蛋白 (1.8 ± 0.04) g/100 g, 乳酸菌含量 1.4×10^6 CFU/mL, DPPH 自由基清除率 $94.67\% \pm 2.73\%$, ABTS⁺ 自由基清除率 $96.33\% \pm 1.01\%$, 还原能力 (87.23 ± 2.44) $A_{700\text{ nm}}$, 超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 酶活 (713.08 ± 17.52) U/mL。**结论** 西兰花乳清发酵饮料色泽好、香味浓郁、口感丰润、营养丰富, 具有较高的抗氧化活性, 具有较好的开发前景。

关键词: 乳清; 西兰花; 发酵; 正交实验; 乳酸菌; 抗氧化活性

Development of broccoli whey fermented beverage and research of its antioxidant activity

LI Kun-Lin, WEI Guang-Qiang, DONG Wen-Ming*, HUANG Ai-Xiang*

(College of Food Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

ABSTRACT: Objective To optimize the fermentation technology of broccoli whey fermented beverage and study its antioxidant activity. **Methods** Whey and broccoli were used as raw materials, probiotics and vegetable enzymes were used to soak and ferment. The optimal technology was selected through single factor and orthogonal experiments, and further quality improvers was added to prepare broccoli whey fermented beverages, and the sensory of the product, physical and chemical, microbiological and antioxidant activities were studied. **Results** The best screening process was: 20% diced broccoli, 15% white sugar, 0.050% starter, fermentation at 35 °C for 6 days; broccoli was filtered out, and 0.265% quality improver was added to the filtrate (the best blending process was:

基金项目: 国家重点研发项目(2018YFD0400102)、云南优质益生菌菌种选育及高原特色乳制品产业项目(2014ZA001)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2018YFD0400102), and the High-Quality Probiotic Strain Selection and the Plateau Characteristics Dairy Industry of Yunnan (2014ZA001)

*通信作者: 董文明, 教授, 主要研究方向为食品科学。E-mail: dongwenming88@sina.com

黄艾祥, 教授, 主要研究方向为食物新资源开发与乳品科学。E-mail: aixianghuang@126.com

*Corresponding author: DONG Wen-Ming, Professor, Yunnan Agricultural University, No.452, Fengyuan Road, Panlong District, Kunming City, Yunnan Province 650201, China. E-mail: dongwenming88@sina.com

HUANG Ai-Xiang, Professor, Yunnan Agricultural University, No.452, Fengyuan Road, Panlong District, Kunming City, Yunnan Province 650201, China. E-mail: aixianghuang@126.com

0.150% sodium alginate, 0.100% β -cyclodextrin, 0.015% sodium citrate), and them were mixed and homogenized. pH of the product was 3.84 ± 0.07 , sugar content was 8°Bx , crude protein was (1.8 ± 0.04) g/100 g, lactic acid bacteria content was 1.4×10^6 CFU/mL, DPPH free radical scavenging rate was $94.67\% \pm 2.73\%$, ABTS⁺ free radical scavenging rate was $96.33\% \pm 1.01\%$, reducing power was (87.23 ± 2.44) A at 700 nm, SOD activity was (713.08 ± 17.52) U/mL. **Conclusion** The broccoli whey fermented beverage has good color, fragrance, rich and smooth taste, rich nutrition, high antioxidant activity, and good development prospects.

KEY WORDS: whey; broccoli; fermentation; orthogonal test; lactic acid bacteria; antioxidant activity

0 引言

乳清(whey)是一种加工干酪制品产生的副产物, 乳清蛋白含量约为 0.6%~1%^[1-2]。通常每生产 1 kg 的奶酪, 就会产生约 8~10 kg 乳清^[3-4]。云南特色酸凝乳制品乳扇和乳饼加工过程也会产生大量的乳清, 目前这部分乳清还没有被合理有效地规模化开发利用^[5-6], 关于乳清蛋白的研究主要还是集中于其抗氧化、调节血糖、调节血脂、抑菌、缓解肌肉减少症等功能性质的研究^[7-9], 因此乳清产品的研制与开发具有一定的意义。

西兰花(*Brassica oleracea* L. var. *italica* piench)又名青花菜, 可食部位含有丰富的生物活性成分, 营养价值极佳^[10-11]。花中维生素 C 含量比菠菜多 0.6 倍, 比番茄多 4 倍; 维生素 A 含量比白菜多 200 倍以上, 比番茄多 5 倍。西兰花提取物内含大量的花青素、多酚以及酮类物质, 对心血管和高血压有调节和预防的功效, 在抗氧化方面具有显著作用^[12-13]。日本的一项研究表明, 西兰花因其具有的营养价值和抗氧化等效果均高于其他蔬菜, 居首位^[14-15], 被称为“蔬菜皇冠”^[16]。

目前, 加工乳制品产生的乳清量巨大, 一直未得到合理的开发利用。西兰花作为生鲜果蔬, 存在易腐、货架期较短问题, 但因其自身具有较高的应用价值, 特别是在抗氧化方面有突出表现, 关于西兰花的产品开发具有深刻现实意义。有关乳清西兰花发酵饮料的产品鲜有报道, 将二者结合, 研发相关产品以求解决乳清、西兰花资源面临的问题, 同时, 还可通过原料的营养以及功能特性实现优化

互补, 提升产品的竞争价值。本研究通过乳清复配西兰花, 添加乳酸菌发酵剂发酵, 研发一款营养丰富、感官优良, 具有一定功能活性的饮料, 并对产品的感官、微生物、理化和抗氧化活性进行研究, 以期提高西兰花、乳清的附加值, 丰富乳清和果蔬饮料市场。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

西兰花: 购自超市。

乳清(加工乳饼剩余的副产物)、荷斯坦牛牛奶(云南德摩菲尔生物科技有限公司); 发酵剂(麦芽糊精、植物乳杆菌、嗜酸乳杆菌、干酪乳杆菌、长双歧杆菌)(80 亿 CFU/g, 昆山佰生优生物科技有限公司); DPPH(1-二苯基-2-三硝基苯肼, 美国 Sigma 公司); 邻苯三酚(纯度 99.2%, 上海阿拉丁试剂公司)。

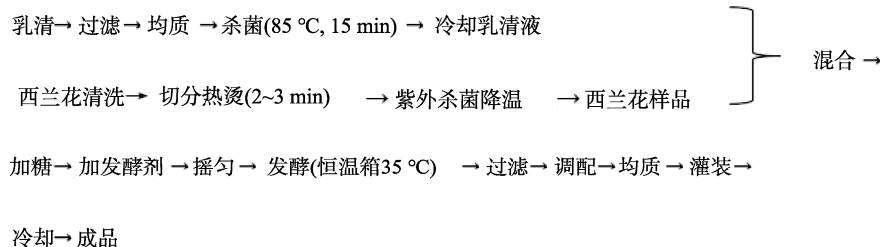
1.2 仪器与设备

HPX-927ME 恒温培养箱(上海博讯实业有限公司); URA14M0018 紫外分光光度计(美国安捷伦公司); TGL20M 高速冷冻离心机(长沙迈佳森仪器设备有限公司); JJ-05725 均质机(上海乔跃电子科技有限公司); ST-3100 pH 计、AR224CN 电子天平(苏州奥豪斯仪器有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 西兰花乳清发酵饮料的研制

西兰花乳清发酵饮料设计加工工艺流程^[17-18]如下:



1.3.2 单因素实验

单因素实验以 DPPH 自由基清除率和感官评分为指标, 选择西兰花添加量、白砂糖添加量、发酵剂添加量、发酵时间 4 个工艺参数进行单因素实验, 具体方法如下:

(1) 西兰花添加量对饮料感官评价的影响

白砂糖添加量 15%, 发酵剂添加量 0.050%, 发酵时间 6 d, 其他因素不变, 以 10%、15%、20%、25%、30% 的西兰花添加量进行单因素实验, 确定西兰花最佳添加量。

(2)白砂糖添加量对饮料感官评价的影响

西兰花添加量 20%，发酵剂添加量 0.050%，发酵时间 6 d，其他因素不变，以 11%、13%、15%、17%、19% 的白砂糖添加量进行单因素实验，确定白砂糖的最佳添加量。

(3)发酵剂添加量对饮料感官评价的影响

西兰花添加量 20%，白砂糖添加量 15%，发酵时间 6 d，其他因素不变，以 0.03%、0.04%、0.05%、0.06 %、0.07%的发酵剂添加量进行单因素实验，以此来选择发酵剂的最佳添加量。

(4)发酵时间对饮料感官评价的影响。

西兰花添加量 20%，白砂糖添加量 15%，发酵剂添加量 0.050%，其他因素不变的条件下，以 2、4、6、8、10 d 进行单因素实验，以此来选择最佳的发酵时间。

1.3.3 正交实验

在单因素实验的基础上，以西兰花添加量、菌株添加量、白砂糖添加量和发酵时间 4 个因素进行正交实验。以 DPPH 自由基清除率和感官评分为指标，确定产品的工艺，因素水平表如表 1 所示。

1.3.4 调配工艺的确定

如表 2^[19-20]所示，以感官评定为指标对西兰花乳清发酵饮料添加剂用量进行筛选。

1.3.5 感官评价

由 10 名具有一定经验的人员(5 男 5 女)组成评定小组，采用 100 分制，分别从西兰花乳清发酵饮料的气味风味、口感、色泽、组织状态 4 个方面进行感官评分，感官评定表如表 3 所示。

1.3.6 产品抗氧化活性测定

(1)DPPH 自由基清除能力的测定

将离心后的西兰花乳清发酵液稀释 50 倍，参照董青青等^[21]的方法，在 517 nm 处测定吸光值。空白组以 4 mL 无水乙醇代替样品，每组测定重复 3 次。计算公式如公式(1)。

DPPH 自由基清除率(%)= $\frac{[1-(A_1-A_2)]}{A_3} \times 100\%$ (1)
式中: A_1 - 空白组的吸光度; A_2 - 样品溶液的吸光度; A_3 - 用无水乙醇代替 DPPH 溶液时测得对应浓度的本底吸光度。

(2)ABTS⁺自由基清除能力测定

参考 VALERIAA 等^[22]的方法测定 ABTS⁺自由基清除

能力，于 734 nm 测定吸光值。总抗氧化能力用 ABTS⁺自由基清除率表示，计算采用如公式(2)。

$$ABTS^{+} \text{ 自由基清除率}(\%) = \frac{(s-sb)}{(c-cb)} \times 100\% \quad (2)$$

式中: s ——ABTS⁺自由基清除能力吸光度; sb ——样品干扰实验吸光度(调零); c ——ABTS⁺工作液吸光度; cb ——蒸馏水吸光度(调零)。

(3)还原能力测定

参考 LIN 等^[23]的方法测定还原能力。吸取上清 1 mL，加入 2.5 mL 蒸馏水和 0.5 mL 1% FeCl₃ 溶液，于 700 nm 测定吸光度。

(4)超氧化物歧化酶酶活测定

参照杨明琰等^[24]的方法，在 320 nm 波长下，自反应 30 s 开始，每隔 30 s 计 1 次吸光值，测定时间为 4 min。空白管用 10 mol/L HCl 溶液代替。计算采用如公式(3)。

$$\text{酶活力}(U) = \frac{(A-B)/A}{50\%} \times \text{反应总体积} \times (\text{样品稀释倍数} / \text{样液体积}) \quad (3)$$

式中: A 为邻苯三酚自氧化速率; B 为发酵液抑制邻苯三酚自氧化速率。

表 1 正交实验设计因素水平表
Table 1 Level table of orthogonal test design factors

水平	因素			
	A 西兰花加量 /%	B 白砂糖添 加量/%	C 发酵剂 添加量/%	D 发酵时 间/d
1	20	13	0.04	4
2	25	15	0.05	6
3	30	17	0.06	8

表 2 西兰花乳清发酵饮料品质改良剂用量确定
Table 2 Determination of the dosage of quality improver for
broccoli whey fermented beverage

添加剂种类	添加量/%
海藻酸钠	0.10、0.15、0.20
β-环糊精	0.05、0.10、0.15
柠檬酸钠	0.010、0.015、0.020

表 3 感官评定表
Table 3 Sensory evaluation table

气味风味(满分 30 分)	口感(满分 30 分)	色泽(满分 20 分)	组织状况(满分 20 分)
发酵香味和乳香味, 25~30 分	酸甜爽口, 口感圆润浓稠, 25~30 分	色泽浓郁, 呈现奶黄色, 15~20 分	凝集性好, 质地均匀, 无泡沫, 15~20 分
香味稍淡, 无异味, 20~24 分	酸甜味过重, 口感较好, 20~24 分	色泽较好, 颜色较浅, 10~14 分	凝集性较好, 较均匀, 10~14 分
无发酵香味或乳香味, 16~19 分	酸甜味较浅, 口感平淡, 16~19 分	有乳清析出, 5~9 分	凝集性较差, 质地不均, 少气泡, 5~9 分
有异味, <15 分	无酸甜味, 口感粗糙, <15 分	浑浊分层, <5 分	凝集性差, 泡沫较多, <5 分

1.3.7 产品理化及微生物指标测定

(1) 产品理化指标的测定

pH 直接用 pH 计进行测定, 使用糖度仪测定糖度, 粗蛋白按照 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》进行测定, 粗脂肪按照 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》进行测定。

(2) 产品微生物指标的测定

按照 GB 4789.35—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 乳酸菌检验》方法进行测定, 菌落总数按 GB 4789.2—94《食品卫生微生物学检验 菌落总数测定》方法测定, 大肠菌群按 GB 4789.3—94《食品卫生微生物学检验 大肠菌群测定》方法测定

1.4 统计分析

本次实验所有数据均重复 3 次。采用 Microsoft Excel 2007 和 Origin 2018 进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 西兰花乳清发酵饮料工艺单因素实验

2.1.1 西兰花添加量

随着西兰花添加量的增加, 西兰花乳清发酵饮料中 DPPH 自由基清除率呈先急剧上升后趋于稳定的趋势。当西兰花添加量为 20% 时, 清除率为 94.97%。造成此现象的原因可能是, 西兰花中含有酚类化合物, 如黄烷醇、单宁、花青素等具有较强抗氧化活性, 同时富含具有较高的抗氧化活性的总黄酮, 在发酵过程中游离酚被释放, 从而提高抗氧化能力^[25]。当西兰花的添加量高于 20% 时, 溶液内的活性类物质已达到一定饱和度, 导致西兰花里的残留抗氧化活性物质难以再很好地游离出。同时感官评分在西兰花添加量为 20% 时, 评分值最高, 为 87.65 分。综合评定, 确定西兰花的最佳添加量为 20%。

2.1.2 白砂糖添加量

白砂糖作为西兰花乳清发酵饮料甜度的来源, 对西兰花乳清发酵饮料的感官评分影响显著。当白砂糖添加量为 15% 时, 感官评分值最高, 为 89.12 分, 而 DPPH 自由基清除率基本趋于平缓趋势, 说明白砂糖添加量对西兰花乳清发酵饮料的 DPPH 自由基清除率影响不大, 与张良等^[26]研究结果相近。综合评定, 确定白砂糖的最佳添加量为 15%。

2.1.3 发酵剂添加量

发酵剂添加量直接影响西兰花乳清发酵饮料的发酵速度以及产品的感官评价, 研究表明发酵菌株在生长繁殖过程中能不同程度地提高发酵产品的自由基清除能力^[27]。当菌种添加量从 0.03% 增至 0.04% 时, DPPH 自由基清除率显著上升, 之后趋于相对平缓。原因可能是 0.04% 的发酵剂添加量是菌株最适激活浓度, 此环境下各菌株的活力

达到最优化。同时, 当发酵剂添加量为 0.05% 时, 感官评分值最高, 为 87.23 分。综上所述, 确定发酵剂的最佳添加量为 0.05%。

2.1.4 发酵时间

发酵时间对西兰花乳清发酵饮料的感官评价以及生化指标影响较大, 本研究测定了西兰花乳清发酵饮料在发酵过程中的感官、DPPH 自由基清除率、超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 酶活以及 pH 变化, 进而确定最佳的发酵时间。

随着发酵时间的延长, 西兰花乳清发酵饮料 DPPH 自由基清除率呈先上升后下降的趋势, 而感官评分则呈先上升后趋于平缓的趋势, 当发酵时间为 6 d 时 DPPH 自由基清除率和感官评分最高, 分别为 94.67% 和 86.99 分。韦仕静等^[28]研究表明, 西兰花酵素在发酵过程中, 当发酵时间为 6 d 左右时多酚含量最高, 而较高的多酚含量有助于提升其对 DPPH 自由基的清除率。随着发酵时间的延长, 饮料中接入的菌种解聚大分子酚类化合物, 可能导致了发酵过程中的总酚和总黄酮含量降低^[29], DPPH 自由基清除率也逐渐降低。

在发酵前 4 d 西兰花乳清发酵饮料的 SOD 酶活以及 pH 变化显著, 4~8 d 时趋于平缓, 在发酵第 8 d 时 SOD 酶活最高为 722.34 U/mL, 之后随着发酵时间的延长, SOD 酶活降低。由于乳清蛋白通过发酵被水解成多肽, 氨基酸侧链基团释放出来, 这些基团具有电子供体作用, 能够与超氧阴离子自由基反应, 从而提高了 $O_2^{\cdot-}$ 的清除能力^[30], 当发酵液的 pH 降到 4 以下时, SOD 酶活受到酸的影响, 随之开始下降。同时, 当发酵时间较短, 西兰花乳清发酵饮料的酸爽度、浓郁度都不够, 利口感稍差, 而当发酵时间超过 6 d 后, 西兰花乳清发酵饮料过酸, 且伴有酒精味, 感官评分值下降。综合考虑西兰花乳清发酵饮料在发酵过程中的感官、DPPH 自由基清除率、SOD 酶活以及 pH 的变化, 确定最佳的发酵时间在 6 d 左右。

2.2 正交实验结果分析

如表 4 所示, 西兰花添加量(A)、白砂糖添加量(B)、发酵剂添加量(C)和发酵时间(D) 4 个因素对产品感官品质的影响程度为 $C > B > D > A$; 对产品 DPPH 自由基清除率的影响程度为 $D > C > B > A$, 其最优水平组合为 $A_1B_2C_2D_2$ 。依照最佳组合添加剂的比例, 进行验证实验, 感官评分为 90.02 分, DPPH 自由基清除率为 94.36%。

2.3 西兰花乳清发酵饮料品质改良剂的确定

通过感官评定确定品质改良剂的添加量, 用量的确定如表 5 所示。

如表 5 所示, 按西兰花发酵液总体积比计算, 通过感官评定可确定: 海藻酸钠的最佳添加量为 0.150%, β -环糊精的最佳添加量为 0.100%, 柠檬酸钠的最佳添加量为 0.015%。在

此条件下,制作的饮料口感细腻浓醇,酸甜可口,无沉淀分层现象,稳定性良好。其中,β-环糊精添加后感官评分值总体较高,最高为 91.21 分。说明 β-环糊精作为品质改良剂在改善

产品口感、消除西兰花发酵、乳清酸化产生的异味方面具有较为积极的作用。同时海藻酸钠作为饮料和乳品的增稠剂,可使添加后的饮品口感柔滑,利口性得到提升。

表 4 正交实验设计结果分析
Table 4 Analysis of the results of orthogonal experiment design

实验号	A	B	C	D	感官评分	DPPH 自由基清除率/%
1	1	1	1	1	64	86.56
2	1	2	2	2	87	94.67
3	1	3	3	3	75	86.12
4	2	1	2	3	85	89.87
5	2	2	3	1	79	86.13
6	2	3	1	2	60	90.04
7	3	1	3	2	81	91.28
8	3	2	1	3	67	87.63
9	3	3	2	1	69	86.90
感官评分						
K1	75.333	76.667	63.667	70.667		
K2	74.667	77.667	80.333	76.000		
K3	72.333	68.000	78.333	75.667		
R	3.000	9.667	16.666	5.333	C>B>D>A	
DPPH 自由基清除率						
K1	89.117	89.237	88.077	86.530		
K2	88.680	89.477	90.480	91.997		
K3	88.603	7.687	87.843	87.873		
R	0.514	1.790	2.637	5.467	D>C>B>A	

表 5 西兰花乳清发酵饮料品质改良剂用量确定
Table 5 Determination of the dosage of quality improver for broccoli whey beverage

试剂及感官评分	添加量/%		
	1	2	3
海藻酸钠/%	0.100	0.150	0.20
感官评定得分	83.64	85.23	80.65
β-环糊精/%	0.050	0.100	0.150
感官评定得分	84.65	91.21	86.60
柠檬酸钠/%	0.010	0.015	0.020
感官评定得分	78.48	81.03	79.74

2.4 西兰花乳清发酵饮料的理化、微生物指标

由西兰花乳清发酵饮料的理化及微生物指标测定结果可知,西兰花乳清发酵饮料的 pH 为 3.84±0.07,糖度为 8 °Bx,粗蛋白为(1.8±0.04) g/100 g,脂肪为(0.7±0.07) g/100 g。产品中未检出大肠菌群,乳酸菌含量为 1.4×10⁶ CFU/mL,其主要原因有:(1)操作过程均在无菌操作台完成,保证了杂菌的无污染;(2)经过杀菌,有效减少了细菌的数量;(3)在酸性条件下,菌群的生长繁殖受限,同时,通过发酵创造较为优益的环境,乳酸菌群得到了较好生长与繁殖。

2.5 西兰花乳清发酵饮料的抗氧化活性

如表 6 所示,西兰花乳清发酵饮料抗氧化活性较为理

想。原因可能是乳清与西兰花在发酵过程中产出多种且大量的酶类, 通过这些酶的转化作用可以将结合态酚酸分解为游离态酚酸, 从而提高发酵原料中酚酸类化合物的生物利用度及抗氧化性。对比丁钦然等^[31]、郭向阳^[32]、罗泽江等^[33]的研究, 可以得出此款饮料的抗氧化活性总体较高, 这进一步说明西兰花乳清发酵饮料在抗氧化活性研究方面具有较为突出的表现。

表 6 西兰花乳清发酵饮料抗氧化活性
Table 6 Antioxidant activity of broccoli whey fermented beverage

抗氧化活性指标	测定值
SOD 酶活/(U/mL)	713.08±17.52
DPPH 自由基清除率/%	94.67±2.73
ABTS ⁺ 自由基清除率/%	96.33±1.01
还原能力/ <i>A</i> _{700 nm}	87.23±2.44

3 结论与讨论

本研究通过实验最终确定西兰花乳清发酵的最佳工艺参数为: 西兰花添加量 20%, 白砂糖 15%, 发酵剂 0.050%, 发酵温度 35 °C, 发酵时间 6 d; 按西兰花发酵液总体积比计算, 最佳调配工艺为: 海藻酸钠 0.150%, β-环糊精 0.100%, 柠檬酸钠 0.015%。该工艺下制得的西兰花乳清发酵饮料口感浓郁润滑、色香味具佳、营养丰富, 乳酸菌含量为 1.4×10⁶ CFU/mL, 同时具有较为理想的抗氧化活性。发酵后过滤所得西兰花(发酵底物)酸甜可口, 质地脆嫩, 可直接食用, 具有进一步开发为果蔬发酵制品的潜能。本研究可为乳清、西兰花的利用拓宽思路, 为功能性乳清果蔬饮料的研发提供参考。

参考文献

[1] LEBLANC JG, LAIO JE, VALLE MJD, *et al.* B-Group vitamin production by lactic acid bacteria-current knowledge and potential applications [J]. *J Appl Microbiol*, 2011, 111(6): 1297–1309.

[2] ALBERTO RC, FERRARETTO A, ARRANZ E, *et al.* Bovine whey peptides transit the intestinal barrier to reduce oxidative stress in muscle cells [J]. *Food Chem*, 2019, 288: 306–314.

[3] 李金华, 李博, 王成涛. 乳清蛋白磷酸化改性对其营养价值和消化吸收的影响[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(5): 19–28.

LI JH, LI B, WANG CT. The effect of phosphorylation modification of whey protein on its nutritional value, digestion and absorption [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2020, 20(5): 19–28.

[4] 林金资. 乳的深度加工[J]. *中国乳品工业*, 1995, 23(4): 199–201.

LIN JZ. Deep processing of milk [J]. *Chin Dairy Ind*, 1995, 23(4): 199–201.

[5] RYAN KN, VARDHANABHUTI B, JARAMILLO DP, *et al.* Stability and mechanism of whey protein soluble aggregates thermally treated with salts

[J]. *Food Hydrocolloid*, 2012, 27(2): 411–420.

[6] KAREB O, MOHAMMED AİDER. Whey and its derivatives for probiotics, prebiotics, synbiotics, and functional foods: A critical review [J]. *Probiotics Antimicro*, 2018, (1): 1–22.

[7] 杨玉红, 林海. 乳清蛋白的组成及生物学活性[J]. *生物学教学*, 2011, 36(4): 5–8.

YANG YH, LIN H. Composition and biological activity of whey protein [J]. *Biol Teach*, 2011, 36(4): 5–8.

[8] TSUDA H, KOZU T, IINUMA G, *et al.* Cancer prevention by bovine lactoferrin: From animal studies to human trial [J]. *Biometals*, 2010, 23(3): 399–409.

[9] 吴尚仪, 李乳姝, 石佳鑫, 等. 乳清蛋白及其生物活性肽调节血糖功能研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(3): 266–271.

WU SY, LI RS, SHI JX, *et al.* Research progress in blood glucose regulation by whey protein and its bioactive peptides [J]. *Food Sci*, 2020, 41(3): 266–271.

[10] FERREIRA SS, PASSOS CP, CARDOSO SM, *et al.* Microwave assisted dehydration of broccoli by-products and simultaneous extraction of bioactive compounds [J]. *Food Chem*, 2018, 246(25): 386–393.

[11] ARES AM, NOZAL, MARÍA J, *et al.* chemical characterization and biological activity determination of broccoli health promoting compounds [J]. *J Chromatogr A*, 2013, 1313: 78–95.

[12] 王晓梅, 崔坤, 陆艳玲. 我国西兰花应用价值及生产、出口前景分析[J]. *中国农学通报*, 2008, 24(11): 478–480.

WANG XM, CUI K, LU YL. Overview of applicable value and production and export prospect of Chinese broccoli [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2008, 24(11): 478–480.

[13] 赵登奇, 孙亚天, 黄建颖, 等. 西兰花叶中生物活性成分的测定[J]. *核农学报*, 2020, 34(6): 1266–1271.

ZHAO DQ, SUN YT, HUANG JY, *et al.* Determination of bioactive components in broccoli leaves [J]. *J Nucl Agric*, 2020, 34(6): 1266–1271.

[14] 马蓉, 梁颖, 王树林, 等. 花椰菜不同品种类型间营养成分差异及烹饪对其含量的影响[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(7): 7–12.

MA R, LIANG Y, WANG SL, *et al.* Differences in nutritional components of different types of cauliflower and the effect of cooking on their content [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2020, 41(7): 7–12.

[15] MENGPEI L, LIHUA Z, SUK S, *et al.* Comparative phytonutrient analysis of broccoli by-products: The potentials for broccoli by-product utilization [J]. *Molecules*, 2018, 23(4): 900.

[16] 李占省, 刘玉梅, 方智远, 等. 我国青花菜产业发展现状、存在问题与应对策略[J]. *中国蔬菜*, 2019, 1(4): 1–5.

LI ZS, LIU YM, FANG ZY, *et al.* Development status, existing problems and countermeasures of broccoli industry in my country [J]. *Chin Veget*, 2019, 1(4): 1–5.

[17] 蒋莹, 沈荷玉, 周可强, 等. 复合酶解法制备山楂绞股蓝乳清多肽复合饮料的工艺优化[J/OL]. *食品工业科技*: 1–22 [2021-01-21]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020060019

JIANG Y, SHEN HY, ZHOU KQ, *et al.* Optimization of the preparation process of hawthorn gynostemma whey polypeptide composite beverage by compound enzymatic hydrolysis [J/OL]. *Food Ind Sci Technol*: 1–22 [2021-01-21]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020060019

[18] 石文贞. 火龙果苹果复合乳饮料的工艺研究[J]. *现代食品*, 2020, (17): 92–95.

- SHI WZ. Study on the technology of pitaya and apple compound milk beverage [J]. *Mod Food*, 2020, (17): 92–95.
- [19] 刘佳, 汪飞. 分析食品添加剂在乳饮料中的应用[J]. *现代食品*, 2020, (17): 116–118.
- LIU J, WANG F. Analysis of the application of food additives in milk beverages [J]. *Mod Food*, 2020, (17): 116–118.
- [20] 陈旋, 王梦格. 食品添加剂在饮料中的应用及危害浅谈[J]. *农村经济与科技*, 2019, 30(14): 32–37.
- CHEN X, WANG MG. The application and harm of food additives in beverages [J]. *Rura Econo Technol*, 2019, 30(14): 32–37.
- [21] 董青青, 胡海杰, 肖文佳, 等. 西兰花乳酸菌饮料的制备及其抗氧化作用研究[J]. *饮料工业*, 2015, 18(5): 30–34.
- DONG QQ, HU HJ, XIAO WJ, *et al.* Preparation of broccoli lactic acid bacteria beverage and its antioxidant effect [J]. *Bever Ind*, 2015, 18(5): 30–34.
- [22] VALERIAA T, MARÍAC A. Amaranth proteins as a source of antioxidant peptides: Effect of proteolysis [J]. *Food Res Int*, 2010, 43(1): 315–322.
- [23] LIN S, JIN Y, LIU M, *et al.* Research on the preparation of antioxidant peptides derived from egg white with assisting of high-intensity pulsed electric field [J]. *Food Chem*, 2013, 139(1-4): 300–306.
- [24] 杨明琰, 张晓琦, 沈俭, 等. 超氧化物歧化酶两种邻苯三酚自氧化测定活力方法的比较[J]. *微生物学杂志*, 2006, 26(3): 40–42.
- YANG MY, ZHANG XQ, SHEN J, *et al.* Comparison of two pyrogallol auto-oxidation methods for determining activity of superoxide dismutase [J]. *J Microbiol*, 2006, 26(3): 40–42.
- [25] 王文琼, 孙志勇, 黄冬成, 等. 乳酸菌发酵对乳清蛋白蓝莓果汁体系特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(13): 42–48.
- WANG WQ, SUN ZY, HUANG DC, *et al.* The influence of lactic acid bacteria fermentation on the characteristics of whey protein blueberry juice system [J]. *Food Ferment Ind*, 2020, 46(13): 42–48.
- [26] 张良, 刘媛洁, 包珍, 等. 响应面法优化仙人掌醇素的发酵工艺[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(17): 170–172, 203.
- ZHANG L, LIU YJ, BAO Z, *et al.* Optimization of the fermentation process of cactus enzymes by response surface methodology [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2018, 46(17): 170–172, 203.
- [27] 张莉静. 无花果汁乳酸菌发酵工艺及其抗氧化性研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2014.
- ZHANG LJ. Fermentation technology of lactic acid bacteria in virgin fruit juice and its antioxidant activity [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2014.
- [28] 韦仕静, 刘涛, 葛亚中, 等. 西兰花酵素在发酵过程中生化指标变化及其抗氧化活性研究[J]. *现代食品科技*, 2017, 33(8): 123–129.
- WEI SJ, LIU T, GE YZ, *et al.* Study on the changes of biochemical indexes and antioxidant activity of broccoli enzymes during fermentation [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2017, 33(8): 123–129.
- [29] KAPRASOB R, KERDCHOECHUEN O, LAOHAKUNJIT N, *et al.* Fermentation-based biotransformation of bioactive phenolics and volatile compounds from cashew apple juice by select lactic acid bacteria [J]. *Process Biochem*, 2017, 59: 141–149.
- [30] VIRTANEN T, PIHLANTO A, AKKANEN S, *et al.* Development of antioxidant activity in milk whey during fermentation with lactic acid bacteria [J]. *J Appl Microbiol*, 2007, 102. DOI: 10.1111/j.1365-2672.2006.03072.x
- [31] 丁钦然, 陈亚楠, 张娇娇, 等. 紫甘蓝-葡萄汁复合乳饮品发酵工艺优化及其抗氧化性研究[J]. *中国酿造*, 2020, 39(1): 203–208.
- DING QR, CHEN YN, ZHANG JJ, *et al.* Optimization of fermentation technology of purple cabbage-grape juice compound milk beverage and its antioxidant activity [J]. *China Brew*, 2020, 39(1): 203–208.
- [32] 郭向阳. 辣木提取物的制备、抗氧化活性及其在饮料中的应用[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(18): 145–150.
- GUO XY. Preparation, antioxidant activity of Moringa oleifera extract and its application in beverages [J]. *Food Res Dev*, 2019, 40(18): 145–150.
- [33] 罗泽江, 张永生, 李琢伟, 等. 银耳蓝莓酵素发酵过程中体外抗氧化性能变化及品质的研究[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(12): 39–45.
- LUO ZJ, ZHANG YS, LI ZW, *et al.* Study on in vitro antioxidant properties and quality during the fermentation of white fungus and blueberry enzyme [J]. *Food Res Dev*, 2019, 40(12): 39–45.

(责任编辑: 于梦娇 张晓寒)

作者简介



李坤林, 硕士研究生, 主要研究方向为乳品科学。
E-mail: 2221089749@qq.com



董文明, 教授, 主要研究方向为食品科学。
E-mail: dongwenming88@sina.com



黄艾祥, 教授, 主要研究方向为食物新资源开发与乳品科学。
E-mail: aixianghuang@126.com